

Válasz
Dr. Csabai István opponens
kérdéseire

Doktori értekezés címe: Az ekliptikai üstökösök eredete és fizikai tulajdonságai

Doktori értekezés szerzője: Tóth Imre, PhD (MTA CSFK KTM CSI)

Doktori értekezés kategóriája: MTA doktori disszertáció

Doktori értekezés tudományos osztálya: MTA XI. Fizikai Tudományok Osztálya

Köszönöm Csabai István opponensnek a disszertációm gondos áttanulmányozását és hasznos észrevételeit. Külön köszönöm az opponensi véleményben feltett 1., 3., 9., 11., 12. és 13. számú kérdéseket, amelyek a Naprendszer kis égitestei fizikai tulajdonságaival és eredetével kapcsolatos további vizsgálatok irányába előremutatóak.

A konkrét kérdésekre a válaszaim a következők:

1. Méret és rádióaktív elemek. Mivel a kis méretű égitestek lehűlése sokkal gyorsabb, mint a nagyobb méretűeké - hiszen a felszín/térfogat arány a kisebbeknél jóval nagyobb, ezért a kis égitestek hatásos rádióaktív fűtésére a leghatásosabbak a rövid élettartamú izotópok. Ugyanis a hosszú felezési idejű rádióaktív elemek által termelt hőt az égitest hővezetéssel rövid idő alatt hatékonyan elvezeti és hosszú időnek kell elteltetni ezekkel az izotópokkal való hatékony felfűtéshez, míg a rövid felezési idejű izotópok által termelt hő elvezetésére nincs elég idő és az égitest felfűtődik. A Naprendszer kialakulásakor a legfontosabb és kellő mennyiségben jelenlévő rövid élettartamú rádióaktív forrás az ^{26}Al volt, amely pozitív béta-bomlással stabil ^{26}Mg -má bomlik el $7,2 \times 10^5$ év felezési idővel. A mintegy 100 és 1000 km átmérőjű égitestek belsejének ^{26}Al rádióaktív bomlásával táplált fűtése hatásosan megtörténhet és a rövid idő miatt a hővezetéssel történő hővesztesség nem csökkenti a felfűtött test hőmérsékletét (Urey, 1955: Proc. Nat. Acad. Sci. 41, 127; Wallis, 1980: Nature 284, 431).

Egyébként a ^{26}Al -nál jóval hosszabb felezési idejű rádióaktív izotópok is jelen vannak és fűtik az égitesteket: a ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U és ^{235}U hatását is számításba veszik, de ezeknek nagyon hosszú, milliárd-tízmilliárd év a felezési idejük, ezért a kis méretű égitestek hővezetés következtében elvesztik a termelt hőt és csak a kőzetbolygók (több ezer kilométer átmérőjű égitestek) belsejének rádióaktív fűtésében játszanak szerepet.

Nagy méretű kisbolygók és törpebolygók belső rádióaktív fűtése. A Naprendszer kis égitesteiben, a kisbolygókban és törpebolygókban is előfordulhatott rádióaktív fűtés (Grimm és McSween, 1989: Icarus 82, 244; 1993: Science 259, 653), de a méretük, anyaguk és belső szerkezetük (hővezetőképességük) különbözősége miatt különböző hatásossággal. A többszáz kilométer átmérőjű nagy aszteroidákban, mint például a 4 Vesta, illetve törpebolygókban, mint például a korábban aszteroidának klasszifikált 1 Ceres belsejében, valamint a nagy méretű neptunuszon-túli objektumokban azok korai fejlődési szakaszában a rádióaktív fűtés a belsejüket megolvaszthatta és differenciálódott belső szerkezetet alakíthatott ki (fajsúly szerinti elkülönülés, l. Ghosh és McSween, 1998: Icarus 134, 187, 1. ábra). A külső Naprendszer nagyobb aszteroidái, nagyobb kentaurok és törpebolygói (nagyobb neptunuszon-túli objektumok) rádióaktivitással való belső fűtését a ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U és ^{235}U rádióaktív izotópok biztosítják hosszú időn keresztül (rövid ideig az ^{26}Al fűtése működött hatékonyan) (De Sanctis, Capria, Coradini, 2001: Astron. J. 121, 2792). A modellszámítások szerint a jegeket is tartalmazó, nagy méretű kis- és törpebolygók illóanyag tartalma hosszú idő alatt szublimációval eltávozott az égitest belsejéből és felszínéről, így a külső Naprendszer ilyen objektumai illóanyagban hiányt mutatnak ("kiszáradtak"), különösen a nagyon illékony szénmonoxid hiányzik belőlük.

Üstökösmagok belső rádióaktív fűtése. A jeges-poros üstökösmagok portartalma rádióaktív izotópokat is tartalmazhatott, amelyek rádióaktív bomlása hőforrás még nagy naptávolságban például az Oort-felhőben is. Az üstökösök magjában a ^{40}K , ^{235}U , ^{238}U és ^{232}Th , mint lehetséges rádióaktív fűtőanyagokkal először Whipple és Stefanic (1966: Mem. R. Soc. Liege, Ser. 5, Vol. 12, 33) számolt először, majd a rövid élettartamú ^{26}Al jelentős rádióaktív fűtési hatására és a Tejútrendszerben, illetve a korai Naprendszerben való előfordulására, illetve a kialakult üstökösmagokba való beépülésére Clayton (1984: Astrophys. J. 280, 366), Cameron (1985: Protostars and Protoplanets, Vol. 2, pp. 1073-1099, Univ. Arizona Press, szerk.: D.C. Black és M.S. Matthews), valamint Dearborn és Blake (1985: Astrophys. J. 288, L21) mutattak rá először. Az üstökösmagok méretétől, kémiai összetételétől (szénmonoxid, amorf és kristályos vízjég, por), valamint porozitásától függő modellek szerint három lehetséges következménye lehet a belső rádióaktív fűtésnek (Priainik és Podolak, 1995: Icarus 117, 420). A legfontosabb változás, ami a rádióaktív belső fűtés miatt bekövetkezhethet, hogy a mag belső hőmérsékletének növekedése a kezdetben amorf vízjég kristályos vízjéggé átalakulhat-e és ezt vizsgálták a különböző hőmodellekben (Priainik és Podolak, 1995: Icarus 117, 420, valamint Priainik 2010: IAU Sympos. 263, 121). Ezen modellek szerint a három lehetőség a következő: 1) a mag teljes egészében megőrzi őseredeti összetételét és szerkezetét; 2) a mag eredeti amorf vízjege a legkülső, felszínközeli vékony rétegét kivéve csaknem teljesen átalakul kristályos vízjéggé; 3) csak a mag legbelső része alakul át az eredeti amorf vízjégből kristályos vízjéggé, de a többi része őseredeti, átalakuláson át nem esett összetételben és szerkezetben marad meg.

2. 2P/Encke üstökös magjának mérete radarmegfigyelések alapján.

A 2P/Encke-üstökös 1980-ban mért $1,1 \pm 0,7 \text{ km}^2$ -es radar-keresztmetszete és az újabb, 2003-ban történt radar megfigyelésekből meghatározott $0,84 \pm 0,17 \text{ km}^2$ radar keresztmetszete, valamint hossz tengelyének hosszára a 2003-ban történt radar megfigyelésekből megadott 9,2 km Harmon és Nolan (2004, 2005: Bull. Amer. Astron. Soc. 36, 1117 és Icarus 176, 175-183) közleményeiben jelentek meg, amelyekben az 1980-ban Kamoun és mások (1980: Science 212, 293.295) által az Encke-üstökös magjának első radarcsillagászati megfigyeléseire is hivatkoznak. A két radar keresztmetszet érték egymással összeegyeztethető Harmon és Nolan (2005: Icarus 176, 175-183, a 176. oldalon a jobb oldali hasáb) szerint. Mindkét radar keresztmetszet *több kilométeres* méretű üstökösmagot jelent, mert a radar keresztmetszet nem azonos a valódi méretekből adódó, a látóirányra merőleges síkba vetített látszó keresztmetszettel. A radar keresztmetszet és a radaral megfigyelt objektum (test, pl. üstökösmag) vetületi keresztmetszete (a látóirányra merőleges síkba vetített keresztmetszete) között a következő összefüggések állnak fenn Ostro (1993: Rev. Mod. Phys. 65, 1235-1279), valamint Harmon és mások (2004: Comets II, Univ. of Arizona Press, Tucson, Arizona, 2004, 265-279) alapján. A radar keresztmetszetet az úgynevezett radar egyenlet adja meg (itt feltételezve, hogy a radarjelet kibocsátó jeladó és vevő ugyanaz, továbbá a jelek vákuumban terjednek, ahol nincs interferencia):

$$\sigma = \frac{(4\pi)^3 \Delta^4 P_r}{P_t G^2 \lambda^2}, \quad (1)$$

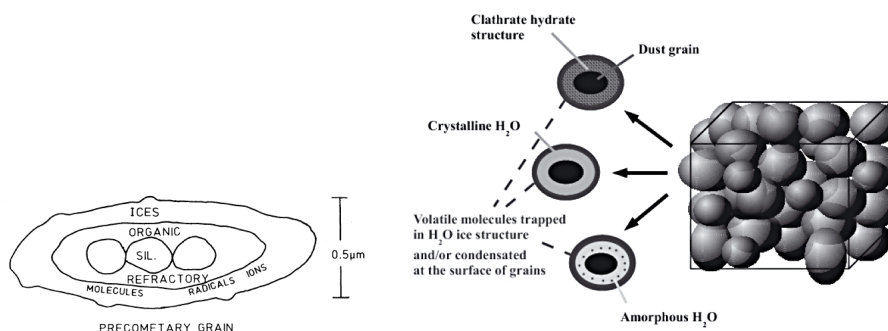
ahol Δ az üstökösmag és a radar közötti távolság, P_r a beérkező radarjel teljesítménye, P_t a kibocsátott radarjel teljesítménye, $G = 4\pi A_e / \lambda^2$ az A_e effektív felületű radar antenna nyeresége (gain) a λ hullámhosszon. A radar keresztmetszet a célobjektum szórási együtthatója. A radar keresztmetszet és a test rádiusza a radar reflektivitáson (visszaverődési tényezőn vagy radar albedón, $\hat{\sigma}$) keresztül függ össze:

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma}{A_p}, \quad (2)$$

ahol A_p az objektum test látóirányra merőleges vetületének keresztmetszete, amely közvetlen összefüggésben van a test valódi méreteivel (pl. gömb rádiuszával, ellipszoid tengelyeinek hosszával, stb.).

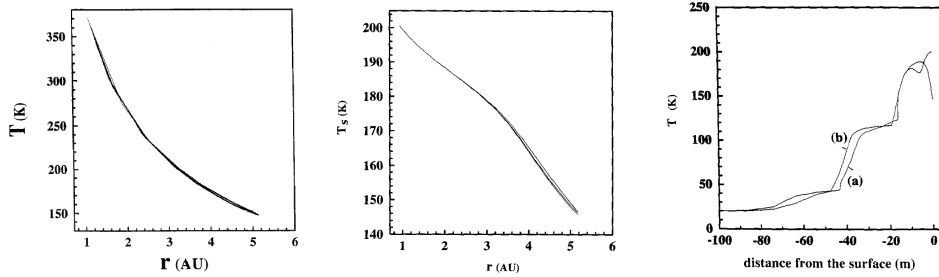
Az üstökös-mag elnyújtott (prolát) ellipszoid alakú modelljét figyelembe véve, amelynek $a > b = c$ a fél-nagy-tengelyei, a 2003-as radar megfigyelések $a = 4,6$ km-t adnak meg (Harmon és Nolan, 2005: Icarus 176, 175-183, 3. táblázat a 180. oldalon), ahol figyelembe vették, hogy az Encke-üstökös magja a látható tartományban végzett fotometriai megfigyelések szerint összetett forgómozgást végez (Belton és mások, 2005: Icarus 175, 181-193). Ez az alapja, hogy az ellipszoid test leghosszabb tengelyének hossza $2a = 9.2$ km a radar megfigyelésekből.

3. Kóma képződés, üstökös aktivitás nagy naptávolságban. Az üstökös-mag egy jeges-poros, nagy porozitású kis égitest, amely jeges-poros-aggregátumok konglomerátumával, összetett porszemcsékkel modellezhető (1. ábra) (Greenberg, 1982: Comets, szerk. L.L. Wilkening, Univ. Arizona Press, Tucson, 131-163; Greenberg és Hage 1990: Astrophys. J. 361, 251).



1. ábra. Az üstökös-magokat felépítő összetett porszemcsék modelljében porszemcsé belső magját szilárd, főleg szilikát szemcsék alkotják, amelyeket szerves molekulák jegei, valamint víz, szénmonoxid és széndioxid jegek vesznek körül. A Naprendszer ősködét alkotó csillagközi anyagban is hasonló felépítésű porszemcsék lehettek (bal oldali panel) (forrás: Greenberg és Hage, 1990: Astrophys. J. 361, 251, 2b ábra). Az üstökös-mag-mátrixot felépítő porszemcsékhez a vízen kívül más molekulák is kötődnek klatrát-hidrát szerkezetben vagy a porszemcsék felületén kondenzálódott formában (jobb oldali panel) (forrás: Marboeuf és mások, 2012: Astron. Astrophys. 542, A82, 24pp, 1. ábra).

Nagy naptávolságban, vagyis a vízjég szublimációjához szükséges mintegy $2,8$ CsE naptávolságon túl az üstökös-mag kóma képződéssel járó gáz kibocsátási aktivitását a mag belsejében meglévő amorf vízjég (Klinger, 1980: Science 209, No. 4453, 271; Icarus 47, 320; Prialnik és Podolak 1992: Astron. Astrophys. 258, L9) és a benne lévő szénmonoxid (Schmitt és mások, 1989: ESA SP-302, 65) alapozza meg. A szénmonoxidon kívül még a széndioxid is szerepet kap az üstökösök nagy naptávolságban megfigyelt aktivitásának létrejöttében (A'Hearn és mások, 1977: Astron. J. 82, 518; Cowan és A'Hearn, 1979: Earth, Moon, and Planets 21, 155; A'Hearn és Cowan, 1980: Earth, Moon, and Planets 23, 41). A szénmonoxid és más gázok két módon is megőrződhetnek az üstökös-magban: 1) az amorf vízjég-mátrixba kötött formában, 2) a jegekbe kondenzáltan (jég-keverékekre és átalakulásaira l. Schmitt és mások, 1989: ESA SP-302, 65; Marboeuf és mások, 2012: Astron. Astrophys. 542, A82, 24pp).



2. ábra. A 46P/Wirtanen ekliptikai üstökös jeges-poros magja maximális (szubszoláris pont) felszíni hőmérsékletének naptávolságtól való függése (bal oldali panel) (forrás: Benkhoff és Boice, 1996: Planet. Space Sci. 44, No. 7, 665, 1. ábra). A 73P/Schwassmann-Wachmann 3 ekliptikai üstökös eredeti porózus víz, szénmonoxid, széndioxid jeges magja maximális felszíni hőmérsékletének (T_s) heliocentrikus távolságtól (r) való függésére öt egymás utáni keringésre (középső oldali panel), illetve a mag belső hőmérsékletének a mag felszínétől mért távolságtól (mélységtől) való függésére (jobb oldali panel). A mag belső hőmérsékleti profilját az ötödik keringés során a pálya napközeli (a) és naptávoli pontjában (b) mutatja a jobb oldali panel két görbéje (forrás: Benkhoff és Huebner, 1995: Icarus 114, 348, 1. és 4. ábrák).

A szénmonoxid három lehetséges mechanizmussal járulhat hozzá az üstökösök kóma kialakításához nagy naptávolságban: 1) az üstökös mag felszínén lévő forrásból közvetlenül, 2) amorf vízjégben megtartott szénmonoxid gáz kiszabadulása által, 3) az üstökös magból, illetve annak felszínéről kiszabadult összetett porszemcsék jegének (köztük szénmonoxid jégnek), illetve szénmonoxid gáznak a kiszabadulásával (a kóma poranyaga, mint másodlagos gázforrás, Di Santi és mások, 2001: Icarus 153, 361). Az amorf vízjégbe bezárt gázok (szénmonoxid is) a vízjég amorf-kristályos fázisátmenetekor kiszabadulhatnak és az üstökös mag felszíne közelében a porózus közeget át elhagyják a mag felszínét és a kómát táplálják, tartják fenn nagy távolságra a Naptól. A vízjég amorf-kristályos fázisátalakulása egy szűk hőmérsékleti tartományban mintegy 155 K körül megy végbe (Klinger 1980: Icarus 47, 320). A szénmonoxid szuperillékony: már igen alacsony hőmérsékleten elkezdi szublimálni, a szublimációs hőmérséklete 26 K. Az üstökös magok belső hőmérséklete 50 K alá csökken a felszín alatt 40 méterrel és mintegy 20 K lesz 100 méternél mélyebben (2. ábra) Benkhoff és Huebner (1995: Icarus 114, 348) modellszámításai szerint. A modell szerint a vízjég amorf-kristályos fázisátmenetének mintegy 155 K-os hőmérséklete a felszín alatt mintegy 10 méteres mélységben lehet. Az őseredeti szénmonoxid tehát az üstökös mag belsejében hosszú időn át megmaradhat, de a hőmérséklet emelkedésére (pl. a vízjég amorf-kristályos fázisátalakulásakor) mintegy 10 méterrel a felszín alatt - tehát a mag felszínének közelében - szublimálni kezd és már nagy naptávolságban kialakíthatja az üstökös kómáját.

Az üstökös magok felszíni hőmérséklete. Az üstökös magok egy hőmodellje alapján a felszíni hőmérséklet naptávolságtól való függését 5 CsE-ig Benkhoff és Boice (1996), illetve Benkhoff és Huebner (1995) modellszámítási eredményei mutatják (2. ábra). A helyszíni üstökös-szondák megfigyelései alapján például a Halley-üstökös magja 0,8 CsE-re a Naptól nagyobb mint 360 K (VEGA 1 IKS, Emerich és mások 1987: Astron. Astrophys. 187, 839), a 19P/Borrelly magja felszíni hőmérséklete 336 ± 7 K volt 1,36 CsE-re a Naptól (Deep Space 1, Soderblom és mások 2004: Icarus 167, 100), a 9P/Tempel 1 magja mintegy 340 K-os volt 1,5 CsE-re a Naptól (Deep Impact, Groussin és mások, 2007: Icarus 191, 63). Mintegy 5 CsE naptávolságon túl a mag felszíni hőmérséklete 150 K alá csökken.

4. Az üstököskóma fényességeloszlásának modellje és a pont-szórási függvénnyel konvolváltnak fényességprofiljának jelölésbeli megkülönböztetése.

Az értekezés (11) képletében szereplő $B(\rho)$ helyett egy más jelölést kellett volna írni: például $B_l(\rho)$, ami a látóirány mentén (erre utal az l) a képsíkban a magtól ρ távolságban megfigyelhető kóma fényességre utal és nincs benne a pont-szórási függvénnyel való konvolúció. A (10) képletben a $B(\rho)$ jelölés már foglalt a mag + kóma modell fényességére, amelyben a pont-szórási függvénnyel való konvolúció is benne van. Az értekezés 18. ábráján a vékony folytonos vonal a pont-szórási függvénnyel konvolváltnak kóma modell radiális fényességprofilját jelöli és ezért nem egyenes vonal a log-log skálán, itt ugyanis az értekezés (10) képletében a kóma fényesség járulékát jelentő ($coma \otimes PSF$) van szó.

5. Az üstökösmag térbeli irány szerint izotróp gáz- és porkibocsátási aktivitásának feltételezése mennyiben helytálló ma? Az üstökösök kómájának nagy távolságból történt földi megfigyelések elemzésére az Eddington (1910: Mon. Not. R. Astron. Soc. 70, 442-458) által kidolgozott "szökőkút" modell alkalmas, amely egy pontforrásból kiáramló gáz- és porrészecskék mozgását írja le. A részecskék kiáramlása a térben minden irányban történik, de a pontforrás Nap felőli oldalán a sugárnyomás miatt a részecskék egy adott távolságban visszafordulnak és a pályájuk egy paraboloid burkolófelületen belül marad. Ekkor még az üstökösmag fogalom csak elvétve fordult elő a szakirodalomban, hiszen nem figyelhették meg közvetlenül ezt a kis égitesttípust és csak elméleti megfontolások, számításokban szerepelt (például Bessel, Bredichin, Terkán), így az általánosabb "pontforrás" szót használták a részecskék forrásának megnevezésére. A megfigyelések szerint a pontforrástól mintegy néhány ezer kilométeres sugarú gömbön belül a részecskék sebessége a térben minden irányban ugyanakkora, állandó. Ez a sugár függ a naptávolságtól és a pontforrás aktivitásának mértékétől, vagyis attól, hogy időegységenként mekkora és milyen részecske áramlik ki a forrásból, de mintegy 1 CsE naptávolságban általában ez a sugár mintegy 2000-5000 kilométeres szokott lenni a megfigyelt üstökösökre. Sőt, Mocknatsche (1938: Leningrad State Univ. Annals. Astron. Series Issue 4), Fokker (1953: Mem. Sci. Liège, Ser. 4, 13, 241-259), valamint Wallace és Miller (1958: Astron. J. 63, 213-219) azt is kimutatták, hogy optikailag vékony esetben (ritka, átlátszó kóma esetén) a paraboloidon belül az oszlopsűrűség a távoli megfigyelő számára a pontforrástól távolodva az "égi érintő síkban" (a látóirányra merőleges síkban, pl. a fotólemez síkjában) pontforrástól mért távolsággal fordított arányban csökken.

Az üstökösök közelében elrepülő helyszíni űrszondák megfigyelései is mutatták, hogy 1) az üstökösmagok felszínének csak kis részéből, diszkrét forrásokból áramlik ki por és gáz jetek formájában, 2) ugyanakkor az üstökösmagnak lehet az éjszakai oldalon is aktivitása (Halley-üstökös, Giotto-szonda, Keller, 1987: ESA SP-278, 447-457; Keller és Thomas, 1989: Astron. Astrophys. L9-L12). Földi megfigyelések magyarázatakor is felmerült az üstökösmag éjszakai oldalának aktivitása, mint például a Hale-Bopp-üstökös porkómájára és a jetjeire (Samarasinha, Mueller, Belton, 1997: EMP1 77, 189-198), illetve a Shoemaker-Levy 1991a1 és a McNaught-Russell 1993v üstökösök magjára is (Waniak és mások, 1998: Icarus 136, 280-297). Külön is érdekes, hogy a 29P/Schwassmann-Wachmann 1 kentaur-ekliptikai üstökös átmeneti objektum rádiótartományban megfigyelt aktivitásának magyarázata szükségessé tette a mag éjszakai oldala aktivitásának (CO kibocsátás) feltételezését (Festou és mások, 2001: Icarus 150, 140-150). Crifo és Rodionov (2000: Icarus 148, 464-478) részletes gáz- és pordinamikai modellt készítettek az üstökösmag aktivitására, amelyben az éjszakai oldal aktivitása is benne van és a C/1996 B2 (Hyakutake) magjának éjszakai oldali aktivitását is leírja.

Földi megfigyelések, illetve a Hubble Űrteleszkóppal végzett megfigyelések szerint vannak olyan üstökösmagok, amelyeknek csaknem a teljes felülete aktív (pl. C/1996 B2 (Hyakutake), 46P/Wiranen).

A Stardust űrszonda által a 81P/Wild 2-üstökös magjáról készített felvételeken is látszik a mag éjszakai oldali aktivitása (Brownlee és mások, 2004: Science 304, 1764-1769). A Deep Impact és Stardust-NEXT űrszondák a 9P/Tempel 1-üstökös közelében 2005-ben és 2011-ben végzett megfigyelései szerint az üstökös-magból kibocsátott por tömegének nagy részét adják a magfelszíni diszkrét források jetjei, a többi por a mag más felületének aktivitásából, valamint az időnként előforduló porkitörésekből kerül a kómába, illetve a porkibocsátásban a mag éjszakai oldala is szerepet játszik főleg a terminátor közelében, de ott is diszkrét forrásokból jön ki a poranyag (Farnham és mások, 2013: Icarus 222, 541-549). A 103P/Hartley 2 üstökös magjának nagy mértékű aktivitása és a mag felszínén a jet-források vándorlása, illetve az éjszakai oldalról történő anyagiáramlás a DIXI/EPOXI űrszonda által történt megfigyelése is mutatja, hogy a mag felszínének aktivitása nem korlátozódik a mag felszínének egy adott részéhez, hanem annak helye megváltozhat, illetve az éjszakai oldal is lehet aktív (Belton, 2013: Icarus 222, 653.661).

Az üstökös-magok éjszakai oldali aktivitása a mag felszíne alatti vízjég amorf-kristályos fázisátmenet, illetve a szuperillékony széndioxid és szénmonoxid szublimációs aktivitásával magyarázható (l. Rosenberg és Prialnik, 2010: Icarus 209, 753-765 legújabb 3-dimenziós modelljét).

Űrteleszkópokkal az üstökösök távoli megfigyelése során egy képelem mérete általában többször tíz kilométeres, ami a megfigyelt kis méretű üstökös-magok méreténél nagyobb. A gáz által a por felgyorsítási tartománya a magot tartalmazó képelemen belül van, tehát a magot tartalmazó képelemtől kezdve már állandó sebességű por fényét lehet megfigyelni az űrteleszkópokkal. A megfigyelt radiális fényességprofilok a magtól a képsíkban mért távolság reciprokával arányos lefutást mutatnak nagyon sok esetben. Bizonyos esetekben az ettől való eltérés is megfigyelhető, amelyet az értekezés 50-55. oldala között mutat be (l. 19. ábra).

6. Az értekezés 19. ábráján látható görbe elemzése: a simítás utáni fluktuáció szignifikáns-e, illetve a kóma fényességének irányfüggése mindig hatványfüggvény-e?

Az értekezés 19. ábráján a 19P/Borrelly-üstökös kómája fényességeloszlásának azimutátszög és radiális irány szerinti függése látható és az azimutatszög szerint feltűnő iránybeli anizotrópiát mutat. Az azimutális szögfüggésben megfigyelhető csúcs a Nap iránya felőli oldalon a kóma fényességnövekedését mutatja kb. 160° azimutatszöggel (coma bulge, tip, nose) és a Nappal ellentett irányban kb. 340° azimutatszögnél fényesség-minimum van (porcsóva iránya). A hatványkitevő a napfelőli oldalon $p \approx -1.15$, vagyis meredeken csökkenő a fényesség radiális irányban, míg a csóva irányában $p \approx -0.95$ kissé ellaposodva csökkenő a fényesség.

A képsíkban a kóma fényességeloszlásának azimutális szögtől való függése a napfelőli oldalon $p < -1$ hatványkitevőjű radiális függést mutat, vagyis meredeken csökken a magtól távolodva, míg a Nappal ellentett irányban laposabb a radiális fényességlefutás $-1 < p < 0$ hatványkitevővel. Ez a kóma fényességeloszlásának "szökőkút" modelljével függ össze (l. az 5. opponensi kérdésre adott választ). Ugyanis a napfelőli oldalon a parabola burkolótól a Nappal ellentett irányba kezdenek "visszahullani" a porszemcsék és a mag körül, illetve a magtól a Nap-üstökös rádiuszvektor irányába távolodva viszonylagos részecskesűrűség növekedés lesz (dust swarm, por-raj, por-sokaság, sűrűsödés), ami laposabb (kevésbé gyors ütemű) radiális fényességcsökkenést eredményez.

Egyébként hatványfüggvény szerinti radiális fényességlefutást eredményez a por-részecskék gyorsulása vagy lassulása, illetve felbomlása kisebb szemcsékre, de ezekben az esetekben $p \neq -1$, de $p < 0$.

Por- és gázjetek (a valóságban poros gázjetek) fényességprofilja nyilvánvaló függést mutat az azimutszögtől és a radiális irányú fényességlefutásuk hatványfüggénytől is eltér, amit a földi megfigyelésekből készített izofóták és fényességlefutási profilok is mutatnak, valamint a modellszámítások is (l. Kitamura, 1986: Icarus 66, 241-257; Icarus 68, 266-275; Körösmezey és Gombosi, 1990: Icarus 84, 118-153; Chick és Gombosi, 1992, 1993: Icarus 98, 179-194; Icarus 104, 167-184; Keller és mások, 1994: Planet. Space Sci. 42, 367-382;). Például Sagdeev, Shapiro, Shevchenko, Szegő (1987: Astrophys. Lett 25, No. 4, 247-251) egyszerű összefüggést adtak meg az azimutszögnek a magtól való távolságfüggésére, amely a magtól távolodva kiszélesedő jetet ír le. A jetek kollimációja is előfordulhat, ami a jet nyílásszögének csökkenését, a jet elkeskenyedését jelenti azimutszögben (Keller és mások, 1994: Planet. Space Sci. 42, 382-282).

A megfigyelések szerint az is előfordulhat, hogy a jetek íve mentén a fényességlefutás a képsíkban a magtól mért ívhosszal volt fordítottan arányos, mint például az IRAS-Araki-Alcock (C/1983 H1) üstökösnél, de radiálisan egyenes mentén ez a függés már nem állt fenn (Storrs, 1986: Icarus 66, 143-153, 9. ábra).

Az értekezésben vizsgált ekliptikai üstökösök jetjei nem okoztak a kóma fényességeloszlásában jelentős eltérést, kivéve a nagyon aktív 19P/Borrelly esetében (l. 19. az értekezés ábráját), ugyanis az ekliptikai üstökösök jet aktivitása alacsony, alig megfigyelhető és jóval gyengébb, mint az Oort-felhőből eredő üstökösöké. Még a kisebb aktivitású ekliptikai üstökösöknek is vannak jetjei, amiket a helyszini űrszondák is megfigyeltek (9P/Tempel 1, 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2), de ezek jetjeinek fényességjáruléka (9P, 103P) nem volt hatással a fényességprofilokra a HST és ISO megfigyelések idején.

A gázkomában a "szülő" molekulák (parent molecules) szétbomlási folyamata az üstökösmagtól nagy távolságban (néhány száz tízezer kilométer után) a hatványfüggvénytől eltérő fényességlefutást eredményez, de az értekezésben vizsgált üstökösöknél a kiválasztott fotometriai tartományban a por fénye dominál, illetve a vizsgált radiális tartomány ennél jóval kisebb volt.

7. PSF illesztési hiba a HST megfigyeléseknél. A HST új Bolygókamerájával (PC2) történt első megfigyelések idején azzal is kísérleteztem, hogy automatizáljam az üstökösmag és kóma fényének szétválasztását, az üstökösmag fotometriáját, de arra a következtetésre jutottam, hogy az interaktív módszer ellenőrizhető, megbízhatóbb, pontosabb eredményt ad. Az interaktív módszer egyszerre kevés objektumra belátható időn (néhány nap, néhány hét) még járható út akár több fotometriai színszűrővel végzett megfigyelés (több képfelvétel elemzése) esetén is. A PSF illesztési hiba a k_n faktorban jelentkezik, amely a model és megfigyelt profilok interaktív illesztésével határozható meg. A k_n -ben természetesen nem mindig csak 5%-os a hiba, hanem akár 10% is lehet, szerencsés esetben 2-3% (az 5% tipikus, leggyakoribb érték). Az illesztés történhet az (X) és (Y) profilok, illetve az azimutálisan átlagolt radiális profilokkal. Az illesztéskor a többi paraméter változatlanul hagyása mellett csak a k_n értékét változtatva általában a annak 5%-on belüli változása ad elfogadható illesztést, amelynek kvantitatív jellemzése a reziduál profil ábrán ellenőrizhető. A k_n ismeretében adott fotometriai szűrőnél és expozíciós időhöz a HST adott kamerájának fotometriai kalibrációja felhasználásával megadható az instrumentális magnitúdó. A k_n hibájából az instrumentális magnitúdó – ami még nem a standard fotometriai rendszerbeli magnitúdó, hibája 0,01-0,02 magnitúdó. A HST kamerája és fotometriai szűrőrendszerének fotometriai kalibrációs hibája néhány ezred magnitúdó, amelynek kicsi a járuléka az összes fotometriai hibához. Az üstökösmag rádiuszában így mintegy 0,02-0,04 km lesz a hiba.

A mintegy 10%-os hiba lehetősége az üstökösrag rádiuszában. Többször előfordul, hogy a rag fotometriai hibája olyan nagy, hogy az üstökösrag rádiusz meghatározási hibája 10%. A 19P/Borrelly esetén az elnyújtott (prolate) ellipszoid modell fél-nagy-tengelyeire ($a > b = c$, c tengely körül forgó test) $a = 4,4 \pm 0,3$ km, $b = 1,8 \pm 0,3$ km adódott (Lamy és mások, 1998: Astronomy and Astrophys. 337, 945). A Borelly-üstökös az egyik példa arra, hogy több hibaforrás is előfordulhat az üstökösrag fényességének meghatározásában, s ezek a következők.

Az üstökösrag fotometriai pontosságát befolyásoló tényezők. A detektor kiolvasási zaja, flat-field korrekció által okozott hiba, az azimutszög szerint átlagolt profilok alkalmazásakor okozott hiba, a fényességprofil illesztés hibája, valamint a fotometriai kalibráció hibái. Mindezek közül a profil illesztés által okozott hiba a legnagyobb (körülbelül néhány század magnitúdó), a többi ehhez képest sokkal kisebb (ezred magnitúdó).

8. Porrészecske méreteoszlás alsó határa. Igen, sajnos elírásról van szó: helyesen $a_0 = 10^{-5}$ cm (10^{-7} m = 0,1 mikron = 1000 Å) szubmikronos porszemcsének felel meg a porszemcse méreteoszlás alsó határa (l. még Hanner, 1983: Proc. ICCE Vol 2, Budapest, 1982, szerk. T.I. Gombosi, 1-22. oldal; Singh, De Almeida, Huebner, 1992: Astron. J. 104, 848).

9. A kumulatív eloszlás függvény megválasztása. A vizsgálatokban használt negatív kitevőjű hatványfüggvény a kis égitestek (kisbolygó, üstökösrag) mérettartományától a meteoroid, meteor és porszemcse méretekig általánosan használatos a csillagászatban, űrfizikában (Jewitt és mások, 2000: Astron. J. 120, 1140, 3.3 alfejezet (8-11) képletek; Davis és mások, 2003: Asteroids III, W.F. Bottke Jr. és mások, Univ. of Arizona Press, Tucson, 545-558. oldal; Weissman és mások 2004: Comets II, M.C. Festou és mások szerk., Univ. of Arizona Press, Tucson, 337-357. oldal, összefoglaló munkái). Természetesen, a negatív kitevőjű hatványfüggvény nullában való nem korlátossága miatt nyilván csak a vizsgált legkisebb égitest vagy porrészecske nem zérus rádiuszáig értelmezhető. A szóbanforgó méreteoszlás függvény alakot a múltban is és napjainkban is (1960-as évektől... 2013,...) alkalmazzák a kis égitestek méreteoszlásának vizsgálatokor. Az üstökösrag szemcséinek méreteoszlását a megfigyelésekből hatványfüggvénnyel először Sekanina és Miller (1973: Science 179, 565) írta le a porcsóvák megfigyeléseire alapozva. Például az ekliptikai üstökösragok negatív kitevőjű hatványfüggvénnyel leírt méreteoszlás függvény alakját legutóbb például Snodgrass és mások (2011: Mon. Not. R. Astron. Soc. 414, 458) alkalmazták és egyébként a HST-vel meghatározott üstökösragok méretét is felhasználták bemenő adatként.

Más alakú méreteoszlásfüggvények a porszemcsétől a törpebolygóig. Az üstökösök porrészecskéinek $f(a)$ méreteoszlás függvényének alábbi formuláját Hanner (1983: Proc. ICCE Budapest, 1982, Vol. 2, szerk. T.I. Gombosi, 1-22. oldal, (2) képlet) vezette be - valószínűségi sűrűség függvény:

$$f(a) = k(1 - a_0/a)^M (a_0/a)^N \text{ (cm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)}, \quad (3)$$

ahol a a gömbalakúnak feltételezett porszemcse rádiusza, a_0 a legkisebb porszemcse rádiusza, M és N az eloszlás paraméterei, k normálási tényező. A fenti eloszlás paraméterei $N = 4.2$ és az M függ az r_h (CsE) heliocentrikus távolságtól (a Halley-üstökös esetén meghatározva)

$$\log(M) = 1.13 + 0.62 \log(r_h) . \quad (4)$$

Ez a méreteloszlás szerepel például az értekezés a 61. oldalán a (27-28) egyenletekben. Egyébként az üstökösor méreteloszlására az egyszerű hatványfüggvénytől eltérő függvények is léteztek (Divine és Newburn, 1983: Proc. ICCE Budapest, 1982, Vol. 2, szerk. T.I. Gombosi, 81-98. oldal), azonban a Halley-üstökös porának helyszíni űrszondás vizsgálataiból a Hanner (1983) által megadott porszemcse méreteloszlás függvény más üstökösökre is érvényesnek és a különböző számításokban jól alkalmazhatónak bizonyult (Singh, De Almeida, Huebner, 1992: Astron. J. 104, 848). Egyébként az üstökösökből a gáz és por kiáramlásának fizikai modellezésén alapuló porrészecske méreteloszlásra Gombosi (1986: ESA SP-250, Vol. 2, 167) vezetett le differenciális méreteloszlás függvényt.

A kis égitestek belső szerkezetét, a belső összetartó erőket is figyelembe vevő ütközési modellt készítettek és ezzel kapcsolatos méreteloszlási függvényeket adtak meg O'Brien és mások (2003: Icarus 164, 334). Modelljükben megvizsgálják az egy illetve két meredekséggel leírható eseteket, mindkét esetben hatványfüggvényekkel, nevezetesen azok szorzatát is és egyéb, az ütközési folyamattal és a testek fizikai paramétereivel kapcsolatos részeket is tartalmazó függvényekkel írják le a méreteloszlást. A kis méretű aszteroidáktól a nagy méretű transzneptun-objektumokig taglalják a módszer alkalmazását.

Függvény illesztése eloszlásfüggvényhez - Egyenes a log-log skálán, töréspont a függvény lefutásában. Természetesen az eloszlásfüggvény paramétereinek illesztése nem a legkisebb négyzetek módszerével történik (log-log skálán egyenes illesztés), hanem adott alakú eloszlásfüggvény megfigyelésekből táblázattal adott pontokhoz való illesztése Kolmogorov-Szmirnov módszerrel történik és a módszer alkalmazásakor a töréspont is kiadódik. A részleteket l. az értekezés 119. oldalán, valamint Lamy és mások (2004: Comets II, szerk. M.C. Festou és mások, Univ. of Arizona Press, 223-264, 261. oldalon) és Snodgrass és mások (2011: Mon. Not. R. Astron. Soc. 414, 458) munkáiban.

A Hale-Bopp üstökös magja. Az Oort-felhővel kapcsolatos üstökösök magjának méreteloszlását bemutató ábra (értekezés 58. ábra jobb alsó panel) megszerkesztésében a Hale-Bopp üstökös magja is figyelembe lett véve, de az ábrázolásban a 12 km-es felső mérethatár az ekliptikai üstökösökkel való összehasonlítás megkönnyítése végett egy közös mérettartomány céljából lett megválasztva.

10. A kilométeresnél kisebb üstökösök és a HST megfigyelések. Valóban, a kérdésben idézett eredeti szöveg túlságosan tömör és a közölni kívánt információ mindenképp bővebb kifejtést, pontosítást igényel. A módosított szöveg a következő lehetne:

”Egy megfigyelt üstökösök magja vagy soha nem ment át szétesési folyamaton vagy pedig még a felfedezése előtt egy szétesett nagyobb mag töredék darabja lett, amit önálló üstökösként fedeztek fel és így vált ismertté. A HST üstökösök átvizsgáló (survey) megfigyelési programra kiválasztott ekliptikai üstökösök, amelyek magjáról kiderült, hogy átmérőjük kilométeresnél kisebb, nem szétesett üstökösök magtöredékei. Bár földi, illetve más űrteleszkópokkal is figyeltek meg ekliptikai üstökösöket, de fontos eredménynek tartom, hogy csak a HST megfigyelések tették lehetővé kilométeresnél kisebb átmérőjű üstökösök fényének detektálását és méretük meghatározását. Az eddigi üstökösök méretmeghatározási eredményekről Lamy és mások (2004: Comets II, H.U. Keller és mások szerk., Univ. of Arizona Press, Tucson, 223-264. oldal) összefoglalója ad információt üstökösönként részletezve az eredményeket, amelyből kitűnik, hogy a szisztematikus és sok ekliptikai üstökösre végrehajtott HST megfigyelési program eredményei közül egyedülállóak a szubkilométeres üstökösökre kapott eredmények is.”

Kiegészítések. Vannak a HST-vel is és más teleszkópokkal is kilométeresnél kisebb átmérőjű üstökösök, magtöredék megfigyelések is, de ezek vagy 1) szétesett üstökösök magtöredékei, vagy 2) Oort-felhő üstökösök magja vagy nyilvánvalóan szétesett magtöredékek (pl. amikor a szétesés folyamata is megfigyelhető volt).

A HST szubkilométeres szétesett ekliptikai üstökösök töredékeit is megfigyelte: például a 73P/Schwassmann-Wachmann 3 ekliptikai üstökös töredékeit is.

Más HST megfigyelési programban a D/Shoemaker-Levy 9 töredékeit is megfigyelték, de ezek között van 1 km-nél nagyobb átmérőjű és szubkilométeres is. Összesen 15 töredék méretétőlhatározták meg, ebből 3 nagyobb, mint 1 km-es, 12 kisebb, mint 1 km, de két kb. 50 méteres méret-meghatározása bizonytalan (Crawford, 1998, LPSC 28, 1351), Rettig és Hahn (2000: Icarus 146, 501) szerint 4 nagyobb, mint 1 km átmérőjű.

A HST Oort-felhővel kapcsolatos üstökösöket is megfigyelt, de kilométeresnél kisebb méretűek csak a C/1999 S4 (LINEAR) néhány száz méteres átmérőjű töredékei voltak (Weaver, Szeanina, Toth és mások, 2000: Science 292, 1329) - tehát ez sem nem ekliptikai üstökös volt és töredékek (szétesett eredeti mag darabjai) voltak.

Földi megfigyelések a C/1983 J1 (Sugano-Saigusa-Fujikawa) Oort-felhővel kapcsolatos üstökös magját mintegy 370 méter rádiuszúnak, azaz 740 méter átmérőjűnek becsülték földi infravörös és látható fénytartományban készült fotometriai megfigyelésekből (Hanner és mások, 1987: Astron. J. 94, 1081). Ez volt az első megfigyelési indikáció arra, hogy az Oort-felhőből eredő üstökösök magjának átmérője is lehet kicsi, szubkilométeres.

Távoli, feltehetően kómával nem rendelkező szubkilométeres üstökösöket nem figyeltek meg sem a HST-vel, sem földi vagy más űrtávcsövekkel (a Halley, Hale-Bopp magja nagy és nagy naptávolságban is kómával rendelkezik). A kilométeresnél kisebb távoli üstökösök még HST-vel sem, illetve a mai nagy földfelszíni teleszkópokkal sem figyelhetők meg.

11. A lehetséges kvázi-Hilda üstökösök kiválasztása. Eloszlás a (k, h) síkon.

Külön köszönöm Dr. Csabai István opponens által feltett kérdést, mert ez új égi mechanikai vizsgálatok irányába előremutató problémafelvetés. A kisbolygók fő övének Hilda-zónájában lévő aszteroidák pályaelemeinek, különösen pedig a Lagrange-féle (k, h) pályaelemeinek statisztikai vizsgálatára eddig még nem került sor, tehát ma (2013) még nem ismert a Hilda-csoport kisbolygóinak a (k, h) síkon való statisztikus eloszlásának típusa, vagyis ez Gauss-eloszlás-e vagy valami más. A Hilda-zóna kisbolygói eddig nem történt ilyen vizsgálat, de a Jupiter-trójai kisbolygók (k, h) síkon való eloszlására Pál és Süli (2001: Distribution of asteroids in the Solar System: Trojans. PADEU, Vol. 14, Frogács-Dajka E., Petrovay K., Erdélyi R. szerk., 285-292, 291. oldal) szerint Gauss-eloszlás illeszthető. Pál és Süli (2001) 1. és 3. ábráin is látszik egy, a körszimmetriától eltérés, aszimmetria. Felvetődik tehát az, hogy a Jupiter-trójaiak és a Hilda kisbolygók (k, h) síkon való eloszlása egyaránt Gauss-eloszlás. A hasonlóság dinamikai alapja az lehet, hogy mindkét kisbolygó csoport tagjai hasonló mozgást végeznek: keringenek a Jupiterhez stabil középmozgás rezonanciában és librációs mozgást is végeznek. A szóbanforgó eloszlásuk hasonlósága tehát ma még nem bizonyított és további vizsgálatokat igényel. Mindenesetre az a tény, hogy eddig csak magyar égi mechanikusok vizsgálták bizonyos kisbolygók (k, h) síkon való eloszlását az ELTE TTK Csillagászati Tanszéke hosszú évtizedekre visszanyúló égi mechanikai iskolájának, elsősorban az Érdi Bálint professzor által megalapozott kutatásoknak.

A középpont kérdése. A (k, h) síkon a kisbolygók eloszlása az origótól azért tolódik el, mert a kisbolygó aktuális pericentrum hosszúsága ϖ és a Jupiter $\varpi_J =$ állandó pericentrum hosszúságának különbsége szerepel a koszinusz és szinusz argumentumaként a $k = e \cos(\varpi - \varpi_J)$ és $h = e \sin(\varpi - \varpi_J)$ képletekben (Murray és Dermott, 1999: Solar System Dynamics, Princeton; Érdi B., 2001: A Naprendszer dinamikája, Eötvös Kiadó). A Jupiter nagyon közel van az origóhoz, de nem pontosan ott: $k = e_J = 0,048, h = 0$. Az ábrán a Hilda kisbolygók aktuális helyzetéből adódó középpont ("+" jel) és a Jupiter helyzete ("X" jel) közötti eltolódás látszik az ábrán, de a Hilda kisbolygók (minta) közül "kilógó" objektumokat keressük, ezért az adathalmaz által kijelölt középpontot kell figyelembe venni.

12. A 7968=133P/Elst-Pizarro fő-övbeli üstökös aktivitása. Az Elst-Pizarro (EP) napközben 2,641 CsE-re, naptávolban 3,678 CsE-re van a Naptól, a pálya excentricitása 0,164, a pálya félnagy tengelye 3,16 CsE, a napköri keringési ideje 5,61 év. Fotometriai mérések alapján az EP tengelyköri forgási ideje $3,471 \pm 0,001$ óra (Hsieh, Jewitt, Fernández, 2004: Astron. J. 127, 2997; Hsieh és mások, 2010: Mon. Not. R. Astron. Soc. 403, 363). Az EP geometriai albedója 0.05 ± 0.02 , vagyis az üstökös magokéhoz hasonlóan alacsony (Jewitt, 2012: Astron. J. 143, 66, 14pp, 2. táblázat).

A standard hőmodell gyorsan forgó testekre érvényes változatát (FRM) alkalmazva a test egyenlítőjénél van a maximális hőmérsékletű sáv (Lebofsky és Spencer, 1989: Asteroids II, Univ. of Arizona Press, Tucson, 128-143. oldal): ez EP esetében napközben 184 K, naptávolban 156 K. Schörghofer (2008: Astrophys. J. 682, 697) szerint a fő kisbolygó-öv Themis zónájában a kis égitestek felszíne alatt mintegy 0,5-1 méter mélységben a szubszoláris pontban (FRM modellben a forgási egyenlítőnél) hőmérséklet mintegy 145 K és a pólusok felé haladva mintegy 100 K körülire csökken, vagyis néhány méteres mélységben a kristályos vízjég stabilan megmaradhat a kis égitest belsejében, függetlenül a szélességi körtől.

Az EP üstökös-aktivitásának ismétlődő jellege kizárja 1) a közvetlen ütközés által történt aktivizálódást, 2) a forgástengely térbeli irányának változását (pl. precessziót), vagyis a forgástengely iránya a térben állandó. Az EP szezonális aktivitása úgy működik, hogy a forgástengely térbeli iránya olyan, hogy naptávol körül a Naptól nem látszik az aktív területet tartalmazó féltekén a tengely közelében levőnek feltételezett aktív terület és a teljes tengelyköri forgási periódusidő alatt sem éri napfény (a féltekén helyi "tél" van). Ezzel szemben napközeli környékén a forgástengely az aktív területtel a Nap felé mutat (helyi "nyár") és az aktív területet a nap nagy részében vagy folyamatosan (a Nap cirkumpoláris ott) éri napfény. Ezért annak ellenére, hogy a tengelyköri forgásidő sokkal kisebb, mint a napköri keringési idő, az aktív területet nem kell hogy minden körbeforduláskor érje napfény csak akkor, amikor a forgástengely térbeli iránya miatt a dőlése ezt megengedi (l. földi "sarki éjszaka" és "sarki nappal" extrém helyzetei, tehát szezonális effektusról van szó).

A még megoldatlan probléma az, hogy az EP esetében csak port figyeltek meg és gázkómát nem, de a megfigyeléseket alátámasztó számítások szerint vízjég szublimációjával a mag felszínéről porkiáramlás is történt a megfigyelt három napközelsége idején: 1996, 2002 és 2007-ben (Tóth 2000: Astron. 360, 375; 2006: Astron. Astrophys. 446, 333 irodalomjegyzékek; Hsieh és Jewitt 2004: Astron. J. 127, 2997; Lowry és Fitzsimmons 2005: Mon. Not. R. Astron. Soc. 358, 641; Hsieh és mások, 2010: Mon. Not. R. Astron. Soc. 403, 363). Az EP aktivitásának legvalószínűbb fizikai alapja a gázkomponens okozta porkibocsátás (Hsieh és mások 2004: Astron. J. 127, 2997, következtetések 4. pontja a 3016. oldalon). Földi nagy teleszkópok, mint a Keck (Mauna Kea) és NTT (ESO) felhasználásával történt megfigyelések sem mutatták közvetlenül vízjég jelenlétét az EP-nál vagy a szublimációja következtében kifejlődött gáz-, illetve porkómát. Színképi megfigyelések ezekkel a teleszkópokkal nem történtek az EP 1996-os és 2002-es aktivitási időszakában. Az EP eddigi megfigyelésével kapcsolatos közleményekből úgy tűnik, hogy eddig még nem fordítottak kellő gondot a színképi megfigyelésre ráadásul a halvány spektrumhoz nagy műszerek lennének szükségesek és eddig csak a képi, fotometriai megfigyelésekre összpontosítottak. (Egyébként pedig a nagy teleszkópokra igen nehéz műszeridőt kapni.) Az EP 2007-es aktivitásakor és azt követően történt néhány színképi megfigyelés is, de a vízjég nyomát nem mutatták ki.

Milyen jegek állnak rendelkezésre az üstökös-aktivitáshoz a fő-övben? A fő aszteroida-öv Themis-zónája kisbolygói - ahol az EP kering - van vízjég: a 24 Themis kisbolygó infravörös színképében Campins és mások (2010: Nature 464, No. 7293, 1320) a NASA IRTF (Mauna Kea, Hawaii) infravörös teleszkópjával a 3,2-3,6 mikron közötti tartományban kimutatták a vízjeget. A 24 Themis kisbolygó a mintegy 1 milliárd évvel ezelőtt bekövetkezett ütközések legnagyobb megmaradt törmeléke, amelynek belsejében megőrzött vízjég az ütközési eseménynek következtében a felszínre került. Jewitt és Guilbert-Lepoutre (2012: Astron. J. 143, 21, 8pp) rámutattak, hogy a felszíni vízjég csak a 24 Themis és az ennél is nagyobb naptávolságban keringő 65 Cybele kisbolygók nem a teljes felületén, hanem annak csak kis részén fordulnak elő és a víz tömegvesztése legfeljebb mintegy 400 kg s^{-1} lehet. A ma megfigyelhető felszíni vízjég néhány ezer évvel ezelőtti ütközés következtében került a felszínre. Az üstökösöknél előforduló cián (CN) 3889 Å emissziós vonalát nem figyelte meg Jewitt és Guilbert-Lepoutre (2012). Az EP lehetséges gázkomponenseinek keresését folytatva Licandro és mások (2011: Astron. Astrophys. 532, A65, 7pp) nagy teleszkópokkal (TNG, WHT, VLT UH2) a CN kibocsátásának mértéke legfeljebb $1,3 \times 10^{21} \text{ molekula s}^{-1}$, ami mintegy 3 nagyságrenddel kisebb, mint az ekliptikai üstökösöknél megfigyelt. Égi mechanikai ellen érveken túl ez is azt jelzi, hogy a fő-öv üstökösei nem kisbolygó pályára áttért ekliptikai üstökösök. hanem a fő-övben keletkezett égitestek.

Az üstökösök porcsóvájának iránya. Az ioncsóvához képest a porcsóva iránya általában erősen eltér a Nap-üstökös rádiuszvektor iránytól. A sugárnyomás nem határos a nagy tömegű porszemcsékre, illetve kis Q_{pr} sugárnyomási effektivitási együtthatóval rendelkező ("átlátszó") szemcsékre, ezek az üstökös pályája mentén a heliocentrikus sebességvektorral közel ellentétes irányban lemaradnak és szétszóródnak. Az EP porcsóváját a kis égitest felszínéről mintegy $1,5 \text{ m s}^{-1}$ kezdősebességgel kiáramló nagy, mintegy 10 mikron átmérőjű porszemcsék alkotják (ez a kezdősebesség megfelel a $3,8 \pm 0,6 \text{ km}$ átmérőjű testnél a szökési sebességnek). A kis tömegű, illetve nagy Q_{pr} sugárnyomási paraméterrel rendelkező porcsemcsék a rádiuszvektorhoz irányához közelebb helyezkednek el a magtól a Nappal ellentétes irányban kifelé. A sugárnyomásra különböző mértékben reagáló porszemcsék egy szélesebb térrészben, legyezőszerűen szétterülő porcsóvát eredményeznek (nem úgy, mint a keskeny ioncsóvák).

13. A közeljövő nagy átvizsgáló (survey) programjai és az üstökösök. Földfelszíni és űreszközökkel végrehajtandó átvizsgáló, kereső programok is indultak és indulnak majd a közeljövőben a Naprendszer kisebb égitestei leltárának kibővítésére. Ezek elsődleges célja a földközeli objektumok (NEO), vagyis földközeli klasszikus kisbolygók (NEA), aktív üstökösök és inaktív, kisbolygónak mutatkozó üstökösök, illetve az 1 és 100 méter közötti méretű meteoroidok felfedezése. Ez utóbbiak bolygónkkal való találkozására az 1908-ban bekövetkezett Tunguz-esemény, mint lokális katasztrófa, a 2013-as cseljabinszki szuperbolida jelenséget előidéző kis égitest lehet példa. A 21. századi égbolt-felmérő programoknak a földközeli objektumok keresésén és felfedezésén kívül a Naprendszer egyéb kis égitestjeinek, illetve a Naprendszeren kívüli asztrofizikai objektumoknak a vizsgálata is célkitűzése. A fenti tudományos célkitűzéseket napjainkban (2013) két nagyfelbontású, érzékeny, nagylátómezejű teleszkópokra épült programja, a Pan-STARRS (PANoramic Survey Telescope And Rapid Response System), amely 2010-ban kezdte el megfigyeléseit teljes műszeridővel, valamint az LSST (Large-aperture Synoptic Survey Telescope), ami a tervek szerint 2019-ben lesz kész az "első csillagfény" fogadására (l. LSST Timeline: <http://www.lsst.org/files/img/LSST-Timeline.jpg>)

A Pan-STARRS program 1,8 méteres első számú földi teleszkópja (PS1), a Haleakala csúcsán (Maui, Hawaii-szigetek) 3055 m tengerszint feletti magasságban lett felállítva és egy 64×64 (4096) darab egyenként 600×600 képelemes CCD-ből összetett 1,4 gigapixels kamerával a látható fénytartományban működik. A Pan-STARRS megfigyelések kezdete előtt nagy reményt fűztek a programhoz. Már a megfigyelések első évében a Naprendszer újonnan felfedezett kis égitestei számának ugrásszerű növekedését adták meg az előzetes becslések (Jewitt, 2003: Earth, Moon, and Planets 92, 465). Az 1. táblázatban többek között az első évben a Pan-STARRS program által új üstökös felfedezések számát mintegy 400-ra becsülte Jewitt (2003). Az első három év tapasztalatai alapján megállapítható, hogy a várakozásokhoz képest jóval kevesebb új felfedezés történt, ami a Pan-STARRS teleszkóp viszonylag kis objektív átmérője (1,8 m) és kis látómezeje (3 fok), valamint a kis látómező ellenére éjszakánként összegyűlt nagy adatmennyiségnek az elhúzódozó feldolgozási ideje együttes következménye lehet.

1. táblázat. A Pan-STARRS program előre jelzett Naprendszer-objektum felfedezései (Jewitt, 2003)

| Objektum-típus | N (2003) | N (start + 1 év) |
|--|----------|------------------|
| Jupiter-trójai | 1600 | ~100000 |
| Kuiper-öv objektum (KBO) | 750 | ~20000 |
| Más óriásbolygóhoz trójai | 1 | ~10000 (?) |
| Kentaur | ~50 | ~1000 |
| Üstökös (minden típus) | ~1000 | ~400 (?)* |
| Széles (tág, jól szeparált) kettős KBO | 3 | ~100 |
| Csillagközi behatoló** | 0 | 1 |
| Nap kísérő csillaga | 0 | ? |

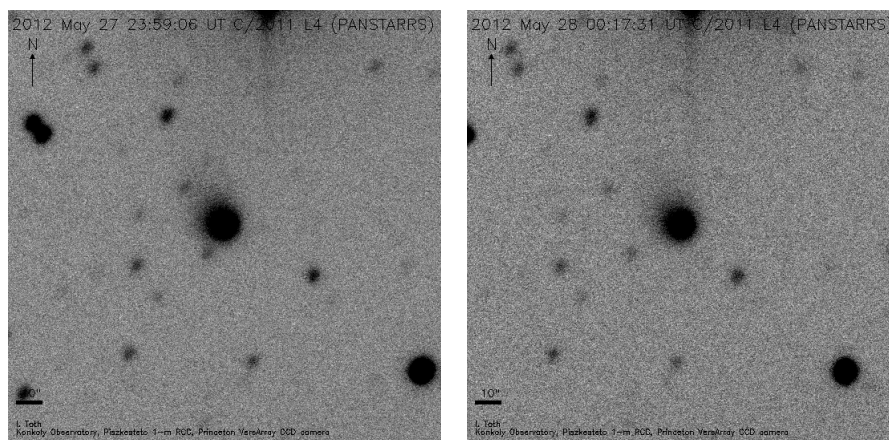
N (2003): az objektumok ismert száma 2003-ban (Jewitt, 2003: EMPI 92, 465, IV. tábl.)

N (start + 1 év): a megfigyelések megkezdése utáni első évben várt új felfedezések száma.

*A teljes szám növekedni fog a program idején.

**Törpecsillag vagy más csillagoktól elszökött égitest (nagy-, törpe- vagy kisbolygó, üstökös).

A Naprendszer üstököseinek felfedezése a nagy égbolt átvizsgáló programok által (Pan-STARRS, LSST), sőt a ma egyre jobb megfigyelési technikát alkalmazó amatőrcsillagászok által azért is fontos, mert a Naprendszer belső térségei felé közeledő üstökösöket már minél előbb, minél nagyobb naptávolságban való felfedezése folytán lehetőség nyílik a napközelség eltelt idő alatt egyéb nagy földi- és űrteleszkópokkal sok és részletes megfigyelés elvégzésére. Erre jó példa lehet a C/2011 L4 (PANSTARRS) üstökös, amelyet 2011. június 6-án fedeztek fel a program során mintegy 21 hónappal a 2013. március 10-én bekövetkezett napközelsége előtt, amikor a Naptól 7.90 CsE-re, a Földtől 6.90 CsE-re volt, tehát valóban nagyon messze, a Jupiter és Szaturnusz pályái között. Illusztrációként bemutatok néhány általam készített képet a C/2011 L4 (PANSTARRS) üstökösről. Az MTA CSFK Konkoly Thege Miklós CSI piszkéstetői obszervatóriumában 2012. május 27/28. éjszaka az üstökösről készített CCD megfigyeléseimből mutat be két képet a 3. ábra. Amikor az üstökös szabad szemmel, illetve kisebb távcsövekkel is megfigyelhetővé vált 2013. márciusában, akkor is folytattam a megfigyelését és egy ekkor készített asztrofotót is bemutatok (4. ábra).



3. ábra. A C/2011 L4 (PANSTARRS) üstökösről 2012. május 27/28. éjszaka az MTA CSFK Konkoly Thege Miklós CSI piszkéstetői obszervatóriumának 1 méteres RCC teleszkópjával a Roper Scientific Princeton Instr. VersArray 1300B CCD kamerával R-szűrővel készült két képfelvétel: 2012. május 27. 23:59:06 UT-kor (bal oldali kép) és 00:17:31 UT-kor (jobb oldali kép). A negatív képek az objektumok jobb láthatóságát segítik: a fényes objektumok feketék, sötét foltok, az égi háttér szürke árnyalatú. Az égi ekvatoriális koordináta-rendszer északi iránya felfelé mutat, a szög-skála a bal alsó sarokban van feltüntetve. Az üstökös fényes diffúz korongja a képek közepén van, a háttércsillagok helyzetének megváltozása a két kép készítése között eltelt időben az üstökös látszó égi mozgása miatt van (balról jobb felé mozdult el). A megfigyelés idején az üstökös a Naptól 4,50 CsE, a Földtől 3,50 CsE távolságra volt a 2013. március 10-i napközelsége felé közeledőben. A nagy naptávolság ellenére a felvételeken már mintegy 15 ívmásodperc látszó átmérőjű kóma figyelhető meg, amely közel negyvenezer kilométer átmérőnek felel meg az üstökös távolságában. (forrás: Tóth Imre által Piszkéstetőn készített képfelvételek).



4. ábra. A C/2011 L4 (PANSTARRS) üstökös 2013. márciusában szabad szemmel, illetve kis távcsővel is megfigyelhető fényes üstökössé vált az északi félteke lakói számára. Napnyugta után kb. egy órával készült felvételen a nyugati horizont közelében látszott az üstökös: a kép alsó harmadában a faágak közelében, azoktól jobbra (észak átlósan jobbra felfelé, a kép átlója kb. 8 foknak felel meg). A kép az üstökös napközelsége után 12 nappal készült 2013. március 22-én 18:23:39 UT-kor Canon EOS 600D DSLR + Tamron 18-200 mm zoom teleobjektívvel $f=200$ mm-nél ($f/6,3$) ISO 3200 érzékenységgel és 5 s expozíciós idővel. A felvétel készítésekor az üstökös a Naptól 0,48 CsE-re, a Földtől 1,19 CsE-re volt, 2013. március 10-én 0,30 CsE legkisebb távolságra közelítette meg a Napot (forrás: Tóth Imre által Budapesten a Svábhegyen készített felvétel).

Az LSST (Large-aperture Synoptic Survey Telescope) más elnevezéssel DMT, Dark Matter Telescope) a chilei Cerro Pachon hegység El Panón nevű csúcsán 2682 m tengerszint feletti magasságban lenne. Ez a közeljövő nagy égbolt-felmérő programja egy felfedező jellegű kutatási projekt, amelynek több mellékeredménye is lehet: a Naprendszer újabb kis égitestjeinek felfedezése, Tejútrendszerbeli és extragalaktikus objektumok felfedezése, vizsgálata (Cook és mások, 2001: BAAS vol. 33, AAS 199th mtg., 101.08, p. 1463). A 8,4 méter főtükr-átmérőjű, 6,9 méter effektív apertúra átmérőjű földi optikai teleszkóp látómező átmérője 7 fokos lenne, emylet egy 3200 megapixeles (3,2 gigapixeles) összetett mozaik-detektorral érnek el, amelynek tudományos célra kihasználható felülete 189 darab, egyenként 4096×4096 (16,8 megapixeles) érzékelőből áll. Egy 20 másodperces expozícióval $V=25$ magnitúdó látszó fényességű objektuma fotometriai megfigyelése lehetséges, a határmagnitúdó (detektálás, felfedezés, azonosítás, mély-ég objektumok észlelése hosszú expozícióval) 28 magnitúdó lenne. A $V=25$ magnitúdójú mozgó objektumok felfedezése, azonosítása 15-20 s expozícióval lehetséges (hosszabb expozíciók már elhúzódó nyomot eredményeznek, ami a fotometriai pontosságot csökkenti). (Izevic és mások, 2007: Proc. IAU Sympos. 236, 2006, NEOs, Our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk, szerk. Milani és mások)).

A mai (2013) tervek szerint a megfigyelések az LSST-vel 2019-ben kezdődnének és mintegy 10 évig tartana a megfigyelési program. Az LSST alapvető tudományos célkitűzései többek között kozmológiai kutatások (sötét anyag, gyenge gravitációs lencsék), optikai (látható) fénytartományban tranziens megfigyelhető tranziensek detektálása (nóvák, szupernóvák, gamma-kitörések optikai utófénylései), a Tejútrendszer objektumainak feltérképezése (újak felfedezése, azonosítása), valamint a Naprendszer részletes feltérképezése (új égitestek felfedezése: kis- és törpebolygók, üstökösök felfedezése) - többek között földközeli objektumok és Neptunuszon-túli objektumok felfedezése. A transzneptun objektumokat 100 CsE távolságban. Csillagfedések megfigyelésével (távoli háttércsillagok fényességének csökkenése előttük elvonuló, a csillagfényt rövid ideig eltakaró transzneptun-objektumok által) további Neptunuszon-túli objektumok, üstökösök, illetve földközeli objektumok felfedezése is lehetséges lesz. Az LSST program eredményeként a Kuiper-öv és a transzneptun-övezet (szórt-korong objektumok is), illetve a belső Oort-felhő térbeli (3-dimenziós) térképe is elkészíthető lesz. A várakozások szerint az LSST megfigyelései által a transzneptun-zónában ismert objektumok száma a mainak 25-szörösére vagy akár 150-szeresére is növekedhet és a 100 km-nél kisebb átmérőjű objektumok is megfigyelhetőek lesznek (Trujillo, 2008: *Solar System Beyond Neptune*, szerk. M.A. Barucci és mások, Univ. Arizona Press, Tucson, pp. 573-585), összesen mintegy 20000 ismert TNO lesz és az LSST-vel a 10 km-es TNO-k is ismertté válnak majd (Jones és mások, 2008: *Bull. Amer. Astron. Soc.* 40, 32.10).

A várakozások szerint az LSST felfedezné a 250 méternél nagyobb átmérőjű földközeli objektumok 90%-át (mintegy 100000 objektumot) és a 140 méter átmérőjűek mintegy 70%-át. Sőt, ami az üstökösök kutatása terén igen fontos, hogy a belső Oort-felhő objektumait ~100 CsE naptávolságban felfedezné, így az Oort-felhő olyan üstökösöket is, amelyek még csak a belső Oort-felhőben járnak és a Naprendszer belső térségei felé közelednek és évtizedek múlva érnek napközelbe a belső Naprendszerben, esetleg a Föld közelébe. Nem csak felfedezné, hanem követné is a felfedezett objektumokat a pontos pályameghatározás céljából, sőt az objektumok fizikai tulajdonságairól és kémiai összetételéről is fontos információot adhatnak majd az LSST megfigyelési adatok (pl. fotometriai adatok).

Az LSST által felfedezett ekliptikai, de főleg Oort-felhővel kapcsolatos üstökösök felfedezése és a magjuk fotometriája nagyban elősegítené 1) a szubkilométeres méretű ekliptikai üstökösök vizsgálatát, illetve 2) egyáltalán az Oort-felhővel kapcsolatos üstökösök méreteloszlásának meghatározását. Ehhez a SEPPCoN program eredményei alapján 100-200 közötti számú üstökösök méretének meghatározása lenne szükséges (de legalább mintegy 100 üstökösnek).

Az üstökösök és más kis égitestek méretének és fizikai tulajdonságai (albedó, hőmérséklet, hőtehetetlenség) meghatározására a látható fénytartományban végzett megfigyeléseken kívül fontos lenne a termális infravörös, esetleg a szubmilliméteres tartományban is megfigyeléseket végezni. A közeljövőben sajnos már nem állnak rendelkezésre infravörös csillagászati mesterséges holdak, mint például az ISO, Spitzer és Herschel, ezért megfelelő földi infravörös csillagászati teleszkópok állnak csak rendelkezésre, mint például a Gemini, Keck NASA IRTF, ESO nagy teleszkópjai, de ezekre igen nehéz műszeridőt kapni. A NASA James Webb Telescope (JWST, korábbi nevén NGST, New Generation Space Telescope) 6,5 méteres teleszkópja az termális infravörösben is tudna megfigyeléseket végezni egyes, már korábban felfedezett objektumokról. Az új űrteleszkóp indítására a tervek szerint 2018-ban kerülne sor (NASA JWST frissített honlapja: <http://www.jwst.nasa.gov/about.html>). A JWST Naprendszer objektumokkal kapcsolatos kutatási lehetőségeiről többek között Cochran (1998: ASP Conf. Ser. Vol. 133, 188) ad összefoglaló ismertetést. Ebből kitűnik, hogy a kisbolygok fő övének távolságában és azon túli, például a távoli transzneptun-övezet objektumainak megfigyelése kerülne előtérbe és nincs szó ebben üstökösök megfigyeléséről. Arra gondolok, hogy a Naphoz közeli üstökösök gyors látszó mozgását a műszer nem tudná pontosan, rezgésmentesen követni (esetleg le is van tiltva a túl gyors követési mozgatás), de a távoli, lassú üstökösöket esetleg igen - bár ezek túl halványak is lehetnek, de az említett cikk erre nem tér ki.

Marad az egyébként ígértes ALMA projekt (Atacama Large Millimeter/sub-Millimeter Array, Chajnator-fennsík, Chile, 5000 méterrel a tengerszint felett) összesen 66 darab egyenként 12 m és 7 m átmérőjű antennákból álló teleszkóprendszer, amellyel a 0,3-9,6 mm tartományban lehet észlelni és 2011. szeptemberétől már megfigyeléseket is végeznek vele. Az ALMA a Naprendszer kis égitestei (földközeli, fő-övbeli kisbolygok, transzneptun-objektumok és üstökösök) megfigyelésére is jól használható. Az üstökösök megfigyelési lehetőségeit Bockelée-Morvan (2008: *Astrophys. Space Sci.* 313, 183) ismerteti. Az ALMA lehetőséget teremt az üstökösökben új molekulák felfedezésére, izomerek vizsgálatára, izotópok azonosítására, izotóp-arányok meghatározására, az üstökösök közötti kémiai összetételben meglévő hasonlóságok és különbségek tanulmányozására. Az üstökösök aktivitása is nyomonkövethető a pálya mentén. Az üstökösök magja is detektálható: például a Naptól és Földtől egyformán 1 CsE távolságban lévő 2 km átmérőjű mag az ALMA 5 km-es bázisvonalán 1 órás integrációs idővel 0,8 mm-es hullámhosszon 5σ -val. Kérdés azonban, hogy minden esetben lesz-e műszeridő biztosítva, azaz csak rendkívüli esetekben, mint például helyszíni üstökösszondás űrmissziók földi előkészítésére, támogatására, illetve rendkívül fényes "nagy" üstökösök megfigyelésére lesz csak lehetőség az ALMA-val?

Érdemes megemlíteni kisebb űrtávcsővel megvalósított, illetve tervezett objektumkereső programot is. A NASA WISE (Wide-Field Infrared Survey Explorer) infravörös csillagászati mesterséges holdja 2009. és 2011. között működött és 40 cm-es objektív átmérőjű optikájával a Naprendszerben 70-100 K hőmérséklet tartományba eső égitesteket tudott detektálni (a Kuiper-öv objektumokat nem, mert azok ennél alacsonyabb hőmérsékletűek). A földközeli objektumok megfigyelését, felfedezését célul tűző kiterjesztett programja a NEOWISE néven futott 2010. októberében egy hónapon át, amelynek során 20 üstököst fedezett fel. NEOWISE a programja során mintegy 153 ezer fő-övbeli kisbolygót figyelt meg és ebből 33 ezer új aszteroidát fedezett fel (akkor összesen mintegy fél millió kisbolygó volt lajstromozva, forrás: http://www.nasa.gov/mission_pages/WISE/news/wise20110201.html). A NEOWISE programban 17 üstököst, 129 földközeli kisbolygót (NEA), 21 potenciálisan veszélyes kisbolygót (PHA) fedezett fel (forrás: NASA JPL NEO, <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/wise/>)

A földközeli objektumok keresésére, felfedezésére, lajstromuk bővítésére erre a célra készített speciális űrteleszkópokkal végrehajtandó programokat terveznek a következő években. Ezek egyike a NASA NEO Star (más elnevezéssel NEO Survey Observatory) programja. (D.K. Yeomans, 2010, NASA JPL:

http://www.nasa.gov/pdf/478018main_10-08_Yeoman_NEO.pdf). A NEO Star egy bolygóközi szonda fedélzetére telepített 50 cm-es objektív átmérőjű és a termális infravörösben érzékelő két űrteleszkóp, amelyek a Vénusz pályájához közel, egymáshoz képest a Nap áttellenes oldalán keringenek a Nap körül. Ezek az űrszondák várhatóan több új üstökös is felfedezhetnének, amelyeket a földi teleszkópokkal nem lehetne felfedezni.

Az értekezésben ismertetett módszer alkalmazási lehetősége az égbolt-felmérő programok által megfigyelt üstökösök fényének a kómától való elválasztására. A nagy égbolt-felmérő programok által készített képfelvételeken lévő üstökösök magjának és kómájának szétválasztására a következő eljárás alkalmazása lenne célszerű:

1. Üstökös keresés
 - (a) Eset: ha nem tudjuk, hogy van-e a felvételen üstökös - általános üstökös-kereső eljárás - mozgó és lehetőleg diffúz (nem csillagszerű) objektum keresése.
 - (b) Eset: ha tudjuk, hogy a felvételen van üstökös - azonosítás, az optocentrum közelítő pixel-koordinátáinak eltárolása.
2. Pontforrás esetén (pl. inaktív üstökös, aszteroida): a csillagokra alkalmazott fotometriai módszerek valamelyikének alkalmazásával kifotometrálni az objektumot.
3. Az objektum jellegzetesen üstökös (nem pontforrás, van diffúz kóma): Az értekezésben ismertetett módszer alkalmazása:
 - (a) A kóma fényességeloszlásának meghatározása az alkalmazandó kóma-modell megválasztása céljából.
 - (b) Az optocenter szubixel pozíciójának meghatározása.
 - (c) Estleges jitter alkalmazása (a teleszóp mechanikai vibrációjából adódó pontatlanság figyelembe vétele).
 - (d) Annak megvizsgálása, hogy az értekezésben ismertetett módszer alkalmazható-e az üstökösök/kóma fényének szétválasztására. Amennyiben alkalmazható a módszer, akkor a mag és kóma modell illesztése a megfigyelt fényességfutáshoz a következő, vázlatosan ismertett lépések szerint:
 - (e) A megfigyeléskor használt kamera fotometria kalibrációjának figyelembe vételével a mag fényességének csillagászati nemzetközi fotometriai rendszerben való megadása.
4. Az eljárás során meghatározott adatok eltárolása, kiértékelése: a mag szubpixel pozíciójának megőrzése, az esetlegesen alkalmazott jitter mértékének számszerű eltárolása, mag, kóma fotometriai paraméterei az hiba (illesztési hiba, kalibrációs hiba) feltűntetésével, por kibocsátási aktivitással összefüggő paraméter ($Af\rho$) meghatározása.

Az eljárás csak részben automatizálható, mert a kóma fényességeloszlásának meghatározása, illetve a fényességprofilok egymáshoz illeszkedési minőségének eldöntése az illesztendő paraméterek finomhangolását igényli, ami interaktív beavatkozást igényel, hiszen az emberi szem ebben a legjobb eszköz. Az interaktív alkalmazás a megfigyelt objektumok (megtalált üstökösök) kis száma esetén kivitelezhető (l. Pan-STARRS, NEOWISE), de probléma lehet a felfedezett objektumok várhatóan nagy száma esetén, mint például amit az LSST programtól várhatunk.

Egyéb megjegyzések:

Külön köszönöm az értekezés nyelvezetére vonatkozó észrevételeket, bírálatokat, amelyek a későbbiek során hasznosíthatók az értekezésre alapozott magyar nyelvű munkák elkészítésekor. Bár nem mentség, de valószínűleg a nagy terjedelmű, magyar nyelven megírt közel 200 oldalas értekezés viszonylag gyors elkészítésének nyomása is közrejátszhatott a helyesírási, nyelvezeti hibák előfordulásához, a szövegben való bennmaradásához. Egy, a nyomtatógép által érzékelt hiba miatt a gép által újra indított nyomtatás következtében előfordult egy észrevétlenül maradt és részben megismételt nyomtatás, ami az adott példány gyors ellenőrzése helyett egy tüzetesebb átnézéssel elkerülhető lett volna. Elnézést kérek a szöveg olvasásában okozott nehézségekért.

Az egyéb észrevételekre a következőket válaszolom:

Vannak a magyar, illetve angol nyelvű szakirodalomban egymásnak megfelelő és gyakran használatos, megszokott kifejezések. Például a "genetic": genetikus, genetikai, fejlődési, fejlődéstörténeti, származástani jelentésű. Valóban, talán szerencsésebb lett volna a felsorolt magyar kifejezések közül valamelyiket használni a dolgozatban, bár szakmai körökben az idegen szó is érthető a szűkebb tudományos probléma taglalásakor.

33-34. o.: a felsorolás formát azért választottam, mert a szándékom az volt, hogy erősen kiemeljem, kihangsúlyozzam a már túlhaladott korábban elterjedt tudományos megállapításokat, állításokat.

72. o., 28. ábra: A 46P/Wirtanen-üstökös magjának R-ben és V-ben megfigyelt fényváltozását mutató fénygörbék nem elegendően sűrű mintavételezése okozhatja, hogy nem tűnnek periódikusnak. Ez gyakori probléma az űrtávcsöves és földi nagy teleszkópokkal történt megfigyelések esetén, mert a műszeridő igen korlátozott, ami nem mindig teszi lehetővé a kedvező mintavételezést, illetve kellően hosszú idősor felvételét. Ettől eltekintve az agyszerű tengelykörüli forgást végző üstök-kösmag fénygörbáját sikerült megfigyelni és a forgási periódust meghatározni.

Több ellenvetésem is lenne a 88. o. 41. ábráján bemutatott üstököskóma és Nap méretének összehasonlításának ábrával történő szemléltetésének megkérdőjelezésével kapcsolatban:

1. A 2007-ben szuperkitörést mutató 17P/Holmes-üstökös kóma méretének a Nap méretével való összehasonlítása még a csillagászok és fizikusok számára sem midig azonnal nyilvánvaló, és mint egy ilyen rendkívüli égi eseménynek egy találó szép ábrán való szemléltetése, az eseményre akár évekkel, évtizedekkel később való emlékeztetésre nem árt még egy MTA doktori dolgozatban sem. A hihetetlennek tűnő óriási látványos kóma méretének a Napéval való összehasonlításának szemléltetése megér egy ábrát.
2. Az MTA Könyvtár Repozitóriuma tárolja az értekezéseket és azok az interneten is hozzáférhetők. Egy MTA doktori értekezést nem csak a szűk szakmai körök (pl. csillagászok és fizikusok) olvasnak, hanem előfordulhat az is, hogy szakmán kívülállók, például akár biológusok (asztrobiológusok), kémikusok, matematikusok, sőt bölcsészek is kezükbe veszik a kötetet, vagy az interneten a PDF fájlt (állományt) böngészik.

Az értekezést interneten és a könyvtári tárolás miatt akár a laikus közönség is nézegeti, olvasgatja a könyvtárakban vagy az interneten. A szakkönyvtárak és az internet a szűk szakmai körnél jóval szélesebb olvasóközönséget biztosítanak (hallgatók is, kívülállók is). Nem árt tehát, ha a Nap mérete és a szuperkitörésben levő parányi égítést óriásira nőtt kómájának mérete a szóbanforgó ábrán összehasonlításban szerepel, így a szélesebb közönség is képet alkothat a jelenségről évekkel vagy akár évtizedekkel később is. Egyébként pedig ma úgy néz ki, hogy a nyomtatásban megőrzött művek előreláthatólag sokkal hosszabb ideig fennmaradnak, megőrződnek, mint a digitálisan tároltak.

3. Stevenson és Kleyna (2010: Astron. J. 139, 2230-2240) 1. ábrája valóban szép kivitelű, de nem mutatja a mag/kóma valódi méretbeli különbségét, mert a mag (magok, magtöredékek) a jobb oldali panelen még egy kisebb kómával (kómákkal) vannak burkolva (diffúz optocenterek, "mini-üstökösök"). Az 1-2 km átmérőjű kis testek nem láthatók és nem érzékelhetők a képen. Méretskála csak az ábraaláírásból lenne kiszámítható a kép mérete és az üstökös megfigyelőtől való távolságának ismeretében. Tehát a mag/kóma méret összehasonlításra sem alkalmas Stevenson és Klyena (2010) 1. ábrája és nem is helyettesítheti az üstökös-Nap vagy üstökös-Jupiter látszó méreteket közvetlenül és azonnal összehasonlító szemléletes képeket. Szerintem nem árt még egy MTA doktori értekezésben sem bemutatni egy látványos és valóban összehasonlításra alkalmas ábrát egy ilyen rendkívüli égi esemény kapcsán. A Stevenson és Kleyna (2010) 1. ábrája az üstökös szuperkitörése részletesebb elemzéséhez nagyon alkalmas illusztráció lenne, de ez túlmutatna az értekezésen. Esetleg inkább mindkét ábrát érdemes lett volna együtt bemutatni (üstökös-Nap méretének összehasonlítása és a Stevenson-Kleyna cikk 1. ábrája).

128-129. o. 62-63. ábra más reprezentációban: az objektumokat a színindexeik alapján 3-dimenziós ábrán történő ábrázolása valóban látványos lenne, amelynek megvalósításán érdemes elgondolkozni, de a statisztikus vizsgálat eredményeit feltétlenül szükséges bemutatni és ezeket az ábrák eredeti formája szerintem jobban és áttekinthetőbben adja vissza.

Budapest, 2013. május 27.

Tóth Imre